

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Aplikace fázovacích dvojbranů
Allpass Twoports Application

2015

Martin Stučka

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student:

Martin Stuška

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Aplikace fázovacích dvojbranů
Allpass Twoports Application

Zásady pro vypracování:

1. Popište vlastnosti přenosové funkce pro fázovací dvojbrany. Podrobněji se zaměřte na aktivní fázovací dvojbran 1. řádu. Odvoďte jeho návrhové vztahy.
2. Navrhněte generátory (2, 3 a 4 fázový) sinusového vícefázového průběhu, proměřte a porovnejte jejich vlastnosti.
3. Vyhodnoťte naměřené výsledky.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] GIFT, S.J.G. The application of all-pass filters in the design of multiphase sinusoidal systems. *Microelectronics journal*. 2000, roč. 31, č. 1, s. 9-13. ISSN 0026-2692.
- [2] Punčochář, J. Fázovací články s operačními zesilovači a jejich použití. *Sdělovací technika*. 1985, č. 4, s. 135-137 a č. 5, s. 166-168.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

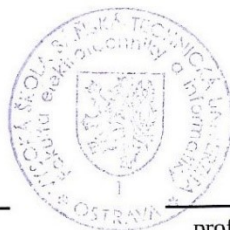
Vedoucí bakalářské práce: **Dr. Ing. Libor Gajdošík**


Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry






prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 4. května 2015


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Dr. Ing. Liboru Gajdošíkovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vlastnostmi přenosové funkce pro fázovací dvojbrany. Podrobně se v ní seznámíme s aktivními fázovacími dvojbrany 1. řádu. Další část práce se věnuje základnímu popisu oscilátorů a podmínek pro vznik oscilací. Jsou zde uvedena schémata a výpočty příslušných veličin jednotlivých zapojení fázovacích dvojbranů.

V praktické části použijeme vlastní navrhnuté generátory (2, 3 a 4 fázový) sinusového vícefázového průběhu a využijeme je k měření v laboratoři a simulaci v programu NI Multisim. Závěrem této práce bude porovnání simulovaných hodnot z programu NI Multisim a naměřených hodnot v laboratoři s vlastními vypočítanými hodnotami.

Klíčová slova

Dvojbran; fázovací článek; aktivní RC obvod; impedance; elektrické filtry; dolní a horní propust; oscilátor; podmínky vzniku oscilací; zpětná vazba; operační zesilovač; sinusový průběh; rezistor; kondenzátor.

Abstract

The thesis is concerned with the qualities of transfer function in phase two-port circuits. It offers a detailed description of first order active phase two-port circuits. The following part focuses on basic description of oscillators and the conditions for emergence of oscillations. The thesis presents schemes and computations of particular variables of individual connections of phase two-port circuits.

In the practical part of the thesis, the designed multiphase sinusoidal oscillators (2, 3, and 4-phase) are used to do measurements in the laboratory and a simulation in NI Multisim program. The conclusion of the thesis offers a comparison of the variables simulated in NI Multisim program and the measured values in the laboratory with my own computed values.

Key words

Twoport; phasing cell; active RC circuit; impedance; electrical filters; upper and lower pass filter; oscillator; Conditions of oscillation; feedback; operational amplifier; a sinusoidal waveform; resistor; capacitor.

Seznam použitých symbolů a Zkratek

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
A_i	[-]	proudový přenos
A_p	[-]	výkonový přenos
A_r	[dB]	relativní hodnota přenosu
A_u	[dB]	napět'ový přenos
C	[F]	kapacita kondenzátoru
f	[Hz]	kmitočet
f_n	[Hz]	mezní kmitočet
f_o	[Hz]	kritický kmitočet
I	[A]	proud
Im	[-]	imaginární osa
R	[Ω]	odpor rezistoru
Re	[-]	reálná osa
U	[V]	napětí
U_1	[V]	vstupní napětí
U_2	[V]	výstupní napětí
X_C	[Ω]	kapacitní reaktance
X_L	[Ω]	indukční reaktance
Y	[S]	admitance
Z	[Ω ; V; A]	impedance
β	[-]	beta
τ	[-]	tau
φ	[-]	fí
ω	[-]	omega

Obsah

Úvod.....	- 10 -
1 Popis a rozdělení Dvojbranů	- 11 -
1.1 Popis Dvojbranů.....	- 11 -
1.2 Rozdělení Dvojbranů.....	- 11 -
1.3 Rovnice dvojbranů	- 12 -
1.4 Přenosové vlastnosti dvojbranů.....	- 13 -
2 Popis a rozdělení elektrických filtrů.....	- 16 -
2.1 Dolnoproustné filtry	- 16 -
2.2 Hornoproustní filtry.....	- 17 -
2.3 Pásmová propust	- 20 -
2.4 Pásmová zádrž.....	- 21 -
3 Oscilátory	- 22 -
3.1 Obecný popis a rozdělení oscilátoru	- 22 -
3.2 Podmínky vzniku oscilací	- 22 -
3.3 Zpětná vazba	- 23 -
3.3.1 Odvození Blackova vztahu:.....	- 23 -
4 Realizace fázovacích článků	- 24 -
4.1 Fázovací článek 1. řádu	- 24 -
4.2 Realizace fázovacích článku aktivními RC obvody	- 25 -
4.3 Aktivní fázovací článek 1. řádu.....	- 25 -
4.3.1 Výpočet parametru a hodnot součástek	- 26 -
4.4 Fázovací článek ze tří fázovacích jednotek s operačním zesilovačem	- 27 -
4.4.1 Simulace v programu NI Multisim.....	- 27 -
4.4.2 Naměřené výsledky	- 28 -
4.5 Fázovací článek ze dvou fázovacích jednotek s operačním zesilovačem ...	- 29 -
4.5.1 Simulace v programu NI Multisim.....	- 29 -
4.5.2 Naměřené výsledky	- 30 -
4.6 Fázovací článek ze čtyř fázovacích jednotek s operačním zesilovačem	- 31 -
4.6.1 Simulace v programu NI Multisim.....	- 31 -

4.6.2 Naměřené výsledky	- 32 -
Závěr	- 33 -
Použitá literatura	- 34 -
Seznam příloh.....	- 35 -

Úvod

Úkolem této bakalářské práce je popsat vlastnosti přenosové funkce fázovacích dvojbranů, podrobně se seznámit s aktivními fázovacími dvojbrany 1. řádu a navrhnout generátor sinusového vícefázového průběhu, u kterého vypočítáme potřebné hodnoty součástek a poté ověříme funkčnost zapojení v laboratoři nebo simulací v programu NI Multisim.

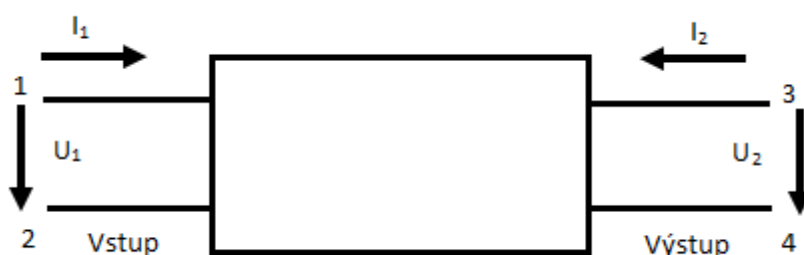
Dále bude v bakalářské práci zmíněný obecný popis oscilátoru, podmínky oscilací a zpětná vazba. Poté se zaměříme na elektrické filtry a jejich rozdělení.

Na závěr bude proveden návrh generátoru sinusového vícefázového průběhu, který bude v laboratoři odměřen, aby bylo možno porovnat nasimulované hodnoty z programu NI Multisim s naměřenými hodnotami z laboratoře a vypočítanými hodnotami.

1 Popis a rozdělení Dvojbranů

1.1 Popis Dvojbranů

Dvojbran je takový čtyřpól, který má čtyři svorky a ty jsou poskládané ze základních elektrických prvků. Svorky jsou rozděleny na dvě dvojice svorek a to tak, že jednou z dvojice svorek vtéká do dvojbranů proud a druhou ten samý proud vytéká (viz obr. 1.1). Podle postupu energie do dvojbranů rozdělujeme dvojici svorek na vstupní a výstupní. Na vstupních svorkách je napětí, které se nazývá vstupním napětím a značí se U_1 , a proud se nazývá vstupním proudem a značí se I_1 . Napětí a proud, který protéká výstupními svorkami, se nazývá výstupní napětí a výstupní proud a značí se U_2 , I_2 . Dvojbran slouží pro zesílení a zeslabení signálu anebo pro změnu frekvenčního spektra signálu.



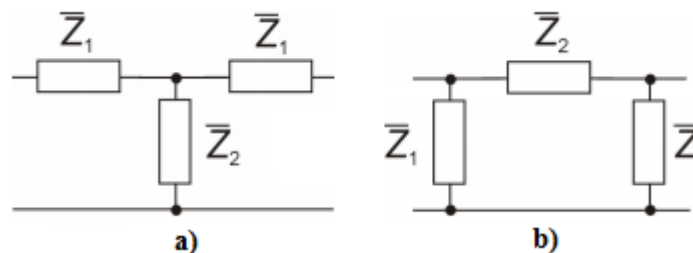
Obrázek 1.1: Dvojbran [1]

1.2 Rozdělení Dvojbranů

Dvojbrany se rozdělují podobně jako jednobrany (dvoj póly). Podle fyzikální struktury na lineární a nelineární, a dále na aktivní a pasivní.

- Aktivní - obsahuje minimálně jeden napěťový či proudový zdroj, který dodává trvale energii.
- Pasivní - skládá se pouze ze základních elektrických prvků bez vazby s vnějším magnetickým polem.
- Lineární - tvoří se z lineárních součástek (rezistor, kondenzátor, cívka).
- Nelineární - pokud je jeden prvek nelineární, pak je celý celek nelineární.

Podle struktury dělíme dvojbrany. Na souměrné, u kterých jde vyměnit vstup za výstup bez jakékoliv změny funkce, a nesouměrné, při kterých u záměny vstupu za výstup dojde ke změně funkce dvojbranů. Souměrné dvojbrany dělíme na podélně souměrné a příčně souměrné (viz obr. 1.2).



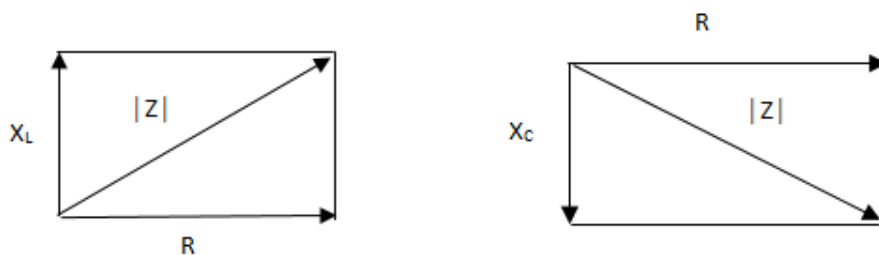
Obrázek 1.2: Dvojbrany: a) podélně symetrické, b) příčně symetrické [1]

1.3 Rovnice dvojbranů

Vlastnosti dvojbranů jsou popsány charakteristickými rovnicemi, které vyjadřují vzájemný vztah mezi vstupním napětím a proudem (U_1, I_1) a výstupním napětím a proudem (U_2, I_2) viz obr. 1.1.

Dvojbran lze popsat několika druhy rovnic a některé z nich zde budou představeny.

Impedance se značí Z a můžeme ji přirovnat k odporu. Jalová složka X se může vyskytnout u impedance a činné složky R . Jalovou složku impedance Z tvoří kapacitní reaktance X_C nebo indukční reaktance X_L (obr. 1.3).



Obrázek 1.3: Znázornění impedance

Impedanční rovnice dvojbranů - uvádí závislost vstupního a výstupního napětí na vstupním a výstupním proudu:

$$U_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2. \quad (1.1)$$

$$U_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2.$$

Kde Z_{11} vstupní impedance, Z_{21} přenosová impedance, Z_{12} zpětná přenosová impedance, Z_{22} výstupní impedance. Vše je při výstupu naprázdno.

Z rovnic získáme Z_{11} , Z_{12} , Z_{21} a Z_{22} koeficienty, které mají fyzikální význam impedanční charakteristice (rovnice 1.2) [1][2].

$$Z_{11} = \frac{U_1}{I_1} \text{ pro } I_2 = 0, \quad Z_{12} = \frac{U_1}{I_2} \text{ pro } I_1 = 0, \quad (1.2)$$

$$Z_{21} = \frac{U_2}{I_1} \text{ pro } I_2 = 0, \quad Z_{22} = \frac{U_2}{I_2} \text{ pro } I_1 = 0.$$

Admitanční rovnice dvojbranů - uvádí závislost vstupního a výstupního proudu na vstupním a výstupním napětí:

$$I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2, \quad (1.3)$$

$$I_2 = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2.$$

Kde Y_{11} vstupní admitance, Y_{21} přenosová admitance, Y_{12} zpětně přenosová admitance, Y_{22} výstupní admitance. Vše je při výstupu nakrátko.

Z (rovnice 1.3) určíme koeficienty a vypočítáme:

$$Y_{11} = \frac{I_1}{U_1} \text{ pro } U_2 = 0, \quad Y_{12} = \frac{I_1}{U_2} \text{ pro } U_1 = 0, \quad (1.4)$$

$$Y_{21} = \frac{I_2}{U_1} \text{ pro } U_2 = 0, \quad Y_{22} = \frac{I_2}{U_2} \text{ pro } U_1 = 0.$$

Hybridní (smíšené) rovnice - uvádí závislost na jedné straně mezi výstupním napětím a vstupním proudem a na druhé straně mezi výstupním proudem a vstupním napětí:

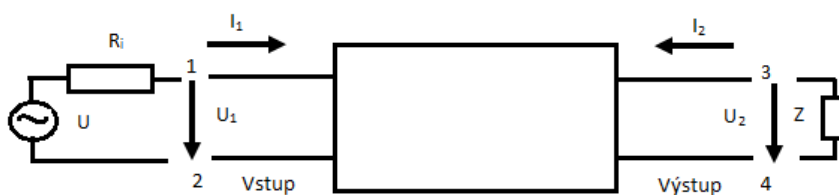
$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2, \quad (1.5)$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2.$$

Kde h_{11} je vstupní impedance a h_{21} přenos proudu a to při výstupu na krátko. Dále h_{12} zpětný přenos napětí a h_{22} výstupní admitance a to při vstupu naprázdno [1].

1.4 Přenosové vlastnosti dvojbranů

Na vstupu reálného dvojbranů je připojen zdroj střídavého napětí U o vnitřním odporu přístroje R_i a na výstupu dvojbranů je připojena zatěžovací impedance Z . Pokud je na vstupu U_1 určité napětí, pak na výstupu U_2 bude napětí závislé na vnitřních vlastnostech dvojbranů. Napětí na vstupu U_1 a výstupu U_2 se mění vzájemným fázovým posunutím a velikostí napětí (viz obr. 1.4).



Obrázek 1.4: *Dynamický režim dvojbranů [1]*

U dvojbranů mají vliv na přenos napětí rozdílné frekvence z hlediska velikosti amplitudy.

Fáze určuje napěťový přenos A_u :

$$A_u = \frac{U_2}{U_1}, \quad (1.6)$$

a proudový přenos A_i , a výkonový přenos A_p :

$$A_i = \frac{I_2}{I_1}, \quad A_p = \frac{P_2}{P_1}. \quad (1.7)$$

Amplitudová frekvenční charakteristika (obr. 1.5) je křivka uvádějící závislosti amplitudy výstupního napětí nebo přenosu na frekvenci při stejné velikosti vstupního napětí.

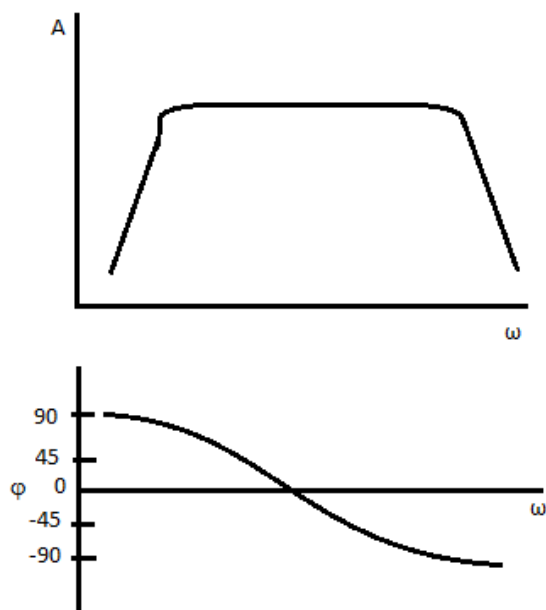
Místo absolutní hodnoty přenosu A_u používá relativní hodnotu přenosu A_r :

$$A_r = \frac{A_u}{A_{u0}}, \quad (1.8)$$

kde A_{u0} vyplývá přenos napětí při referenční frekvenci, která se určuje uprostřed přenášeného pásma. Relativní hodnota přenosu se uvádí v decibelech (dB):

$$A_{r(dB)} = 20 \log \frac{A_u}{A_{u0}}. \quad (1.9)$$

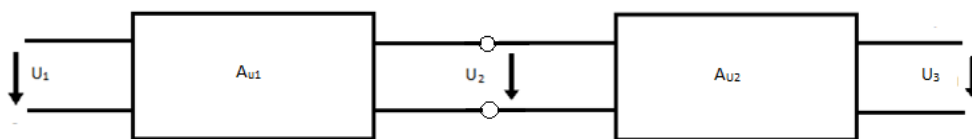
Fázovou frekvenční charakteristikou čtyřpólu (obr. 1.5) se graficky znázorňuje ze závislosti fáze výstupního napětí.



Obrázek 1.5: Charakteristiky aktivních dvojbranů: a) amplitudová frekvenční charakteristika, b) fázová frekvenční charakteristika

Pokud za sebe dáme dva nebo více dvojbranů jako na (obr. 1.6) získáme součin jednotlivých přenosu dvojbranů. Pro dva za sebe zapojené dvojbrany je výsledný napěťový přenos:

$$A_u = \frac{U_2}{U_1} * \frac{U_3}{U_2} = A_{u1} * A_{u2}. \quad (1.10)$$



Obrázek 1.6: Spojení dvojbranů za sebou [1]

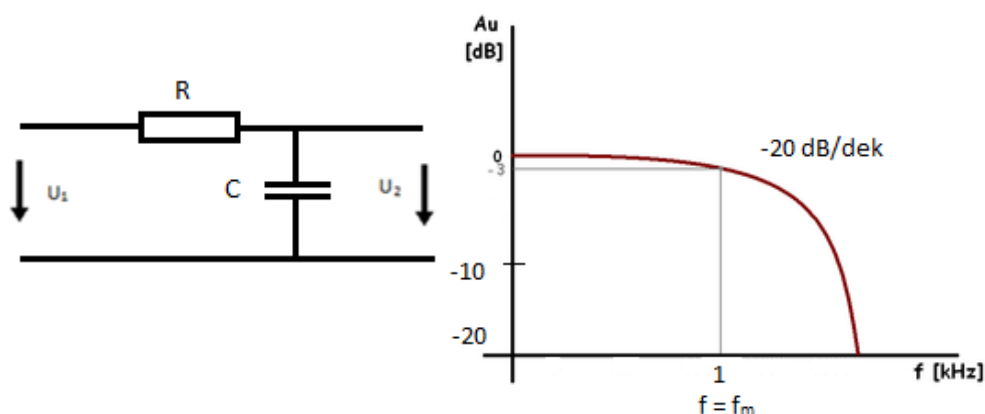
2 Popis a rozdělení elektrických filtrů

Elektrické filtry jsou dvojbrany (většinou lineární) a propouští signál bez nebo jen se značným malým útlumem harmonické složky spektra zpracovaného signálu v určitém pásmu kmitočtu, který se nazývá propustné pásmo. Mimo tuto oblast je signál silně tlumen a to se nazývá nepropustné pásmo.

Filtry je možno sestavit z různých kombinací rezistorů, kondenzátorů a induktorů. Dále se dělí na pasivní a aktivní filtry. Pasivní filtr se používá všude tam, kde nejsou vysoké nároky na přesnost přibližné hodnoty přenosové funkce filtru. Aktivní filtry obsahují zesilovač nebo více zesilovačů. Filtry dělíme podle účelu, ke kterému mají sloužit, a rozdělujeme je do čtyř typů. Dolní propust (low-pass), horní propust (high-pass), pásmová propust (band-pass), pásmová zádrž (band-stop) [3].

2.1 Dolnopropropustné filtry

Jako dolní propust se označuje filtr, který propouští všechny kmitočty menší než horní mezní kmitočet. Nejjednodušší zapojení je integrační členek (obr. 2.1).



Obrázek 2.1: Dolnopropropustné filtr RC, a) zapojení, b) frekvenční charakteristika

Napěťový přenos odvodíme ze vstupního napětí U_1 a výstupního napětí U_2 . Při odvození očekáváme, že vnitřní odpor zdroje signálu je nulový a zatěžovací odpor je nekonečně velký, a proto ho můžeme opomenout.

Pro dvoubran RC píšeme vztah:

$$A_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{\frac{j\omega C}{j\omega C R + 1}}{\frac{j\omega C}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega CR} \quad (2.1)$$

Rovnici můžeme ulehčit zavedením časové konstanty τ , kde $\tau = RC$. Časová konstanta je čas, za který by se kondenzátor nabíjel na hodnotu U , pokud by se nabíjel lineárně. Ale v praxi se nabíjí exponenciálně. Napětíový přenos bude mít tvar:

$$A_u = \frac{1}{1+j\omega\tau}. \quad (2.2)$$

A teď dosadíme za $\omega = 2\pi f$.

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_m}, \quad (2.3)$$

kde je f_m mezní frekvence filtračního článku. A proto napětíový přenos bude mít tvar:

$$A_u = \frac{1}{1+j\frac{f}{f_m}}. \quad (2.4)$$

Absolutní hodnota napětíového přenosu bude v decibelech a bude mít tvar:

$$|A_u| = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_m}\right)^2}}. \quad (2.5)$$

Útlumová frekvenční charakteristika z (obr. 2.1):

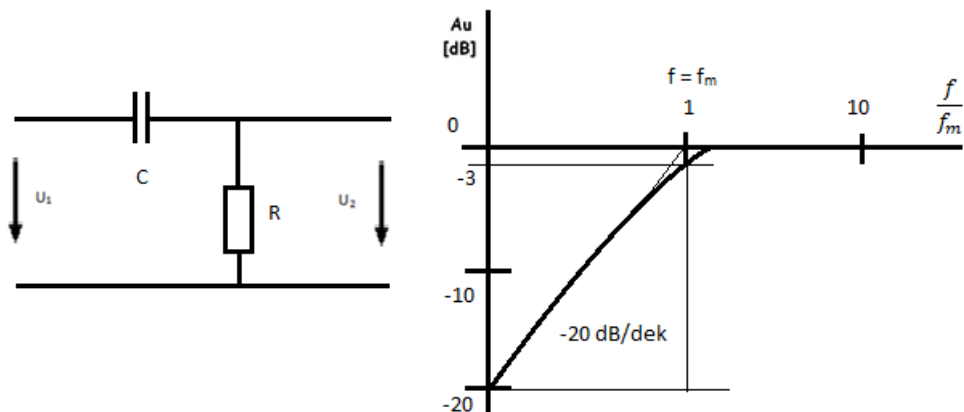
$$Au \text{ (dB)} = 20 \log \frac{f}{f_m}. \quad (2.6)$$

Při frekvenci $f = f_m$ má odklon -3 dB, při zvýšení frekvence se přenos napětí snižuje o -20 dB/dek (dekáda) [3].

2.2 Hornopropustní filtry

Jako horní propust se označuje filtr, který nepropouští signál o nízkých kmitočtech.

Zapojení je derivační článek:



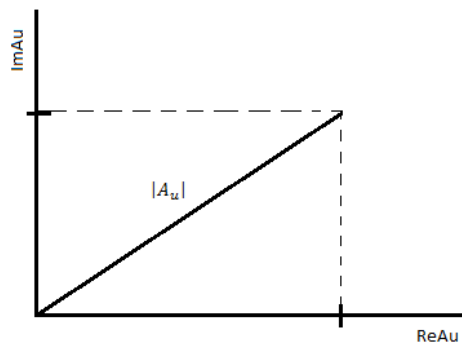
Obrázek 2.2: Hornopropustní filtry, a) zapojení, b) frekvenční charakteristika

Z (obr. 2.2) plyne, že frekvence, která je nižší než mezní frekvence f_m má pokles -20dB/dek a při frekvenci $f = f_m$ je pokles přenosu -3 dB.

U derivačního članku odvodíme frekvenční a fázovou charakteristiku. Přenos napětí A_u se skládá z reálné části ReA_u a imaginární části ImA_u .

Absolutní hodnota $|A_u|$ je:

$$|A_u| = \sqrt{(ReA_u)^2 + (ImA_u)^2}. \quad (2.7)$$



Obrázek 2.3: Fázová kmitočtová charakteristika derivačního članku

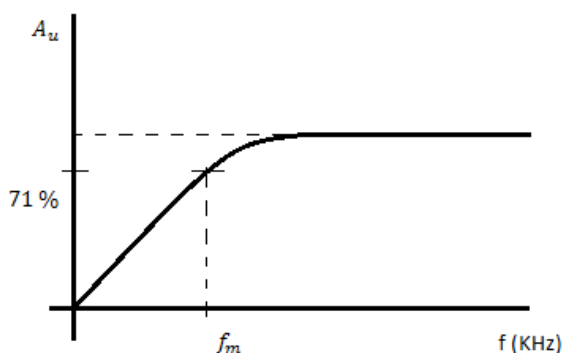
Z (obr. 2.3) odvodíme:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Im A_u}{Re A_u} \Rightarrow \varphi = \operatorname{arctg} \frac{Im A_u}{Re A_u}. \quad (2.8)$$

Mezní kmitočet - je kmitočet při, kterém je:

$$|A_u| = \frac{A_{max}}{\sqrt{2}}. \quad (2.9)$$

A poklesne A_u na hodnotu $\approx 71 \%$



Obrázek 2.4: Mezní kmitočet u derivačního članku

Pro mezní kmitočet f_m platí:

$$R = |X_C| = \frac{1}{\omega C}. \quad (2.10)$$

$$\omega RC = 1 \Rightarrow \omega = \frac{1}{RC}. \quad (2.11)$$

Dosadíme za $\omega = \omega_m$ kde, $\omega_m = 2\pi f_m$:

$$2\pi f_m = \frac{1}{RC} \Rightarrow f_m = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (2.12)$$

Poměr napětí U_2/U_1 při mezní frekvenci f_m :

$$A_u^2 = \frac{U_2^2}{U_1^2} = \frac{\omega^2 R^2 C^2}{(\sqrt{1+(\omega RC)^2})^2} = \frac{\omega^2 \frac{1}{\omega^2 C^2} C^2}{1 + \omega^2 \frac{1}{\omega^2 C^2} C^2} = \frac{1}{1+1} = \frac{1}{2}, \quad (2.13)$$

$$A_u^2 = \frac{1}{2} \Rightarrow A_u = \sqrt{\frac{1}{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,71.$$

Poměr v dB:

$$A_u = 20 \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} = 20(\log 1 - \log \sqrt{2}) = -20 \log 1,4142 \cong -3 \text{ dB}. \quad (2.14)$$

Výsledný přenos je $A_u = -3 \text{ dB}$.

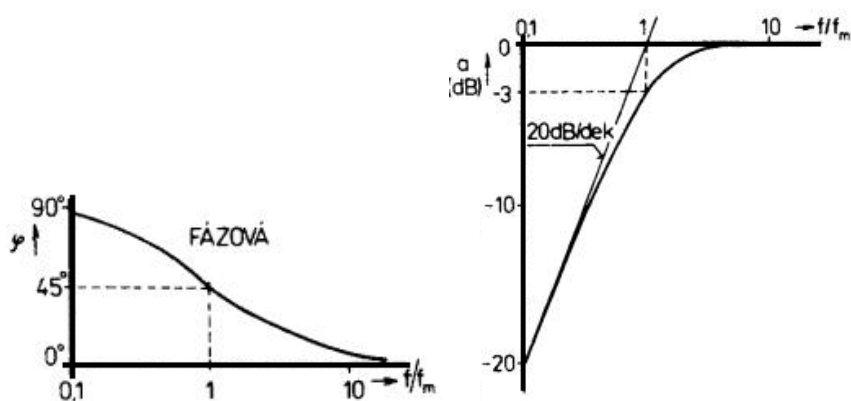
Fázový posun mezi napětím U_1 a U_2 :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_C}{R} = \frac{\frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{1}{\omega RC}. \quad (2.15)$$

Platí:

$$R = \frac{1}{\omega C}. \quad (2.16)$$

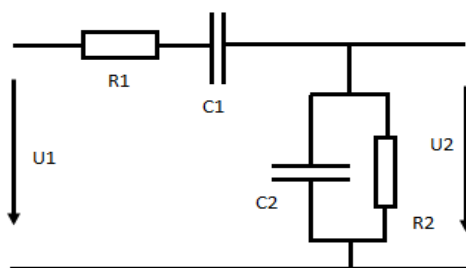
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\frac{1}{\omega C} \omega C} = \frac{1}{1} = 1 \Rightarrow \varphi = 45^\circ. \quad (2.17)$$



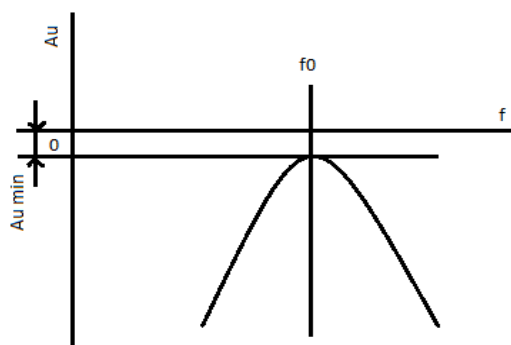
Obrázek 2.5: Frekvenční a fázová charakteristika derivačního članku [3]

2.3 Pásmová propust

Zapojení je Wienův článek, který je kombinací dolní a horní propusti. Propustí signál, který je zeslaben o 1/3 ze vstupního signálu.



Obrázek 2.6: Wienův článek zapojení



Obrázek 2.7: Wienův článek frekvenční charakteristika

Maximální přenos při kritické frekvenci f_o :

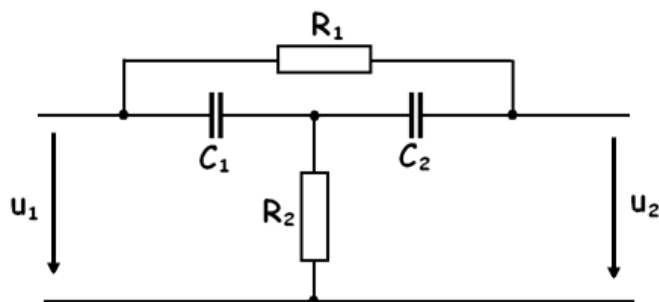
$$f_o = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (2.18)$$

$$R_1 = R_2 = R. \quad (2.19)$$

$$C_2 = C_1 = C. \quad (2.20)$$

2.4 Pásmová zádrž

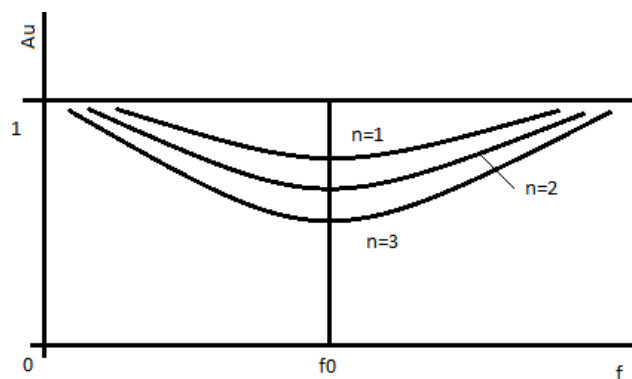
Nepropouští signál určitých kmitočtů. Na obrázku 2.8 je zapojení T článku (nazývá se článek s nulovým přenosem).



Obrázek 2.8: Pásmová zádrž zapojení

Napěťový přenos je nejmenší při kritické frekvenci (obr. 2.9):

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (2.21)$$



Obrázek 2.9: Pásmová zádrž útlumová frekvenční charakteristika [3]

3 Oscilátory

3.1 Obecný popis a rozdělení oscilátoru

Oscilátor je samotný oddíl elektrických obvodů, který se liší tím, že nezpracovává žádný vstupní signál. Sám je zdrojem střídavého elektrického signálu. Uvnitř oscilátorů vznikají kmity elektrického proudu, kterým se říká oscilace. A tyto oscilace vznikají dvojím způsobem:

- 1) základem oscilátorů je zesilovač s kladně zpětnou vazbou. Pro zajištění kladné zpětné vazby musí být napětí přivedené zpětnou vazbou na vstup v takové fázi, aby výsledný fázový posun byl nulový. Takového jevu se dosahuje pomocí vhodných zapojení obvodu RC a LC.
- 2) základem je elektrický prvek se záporným diferenciálním odporem.

Oscilátor může vytvářet různé průběhy napětí:

- harmonické (sinusový průběh).
- neharmonické (nesinusový průběh - obdélník) [4].

3.2 Podmínky vzniku oscilací

- 1) Fázová podmínka - fázový posun byl nulový:

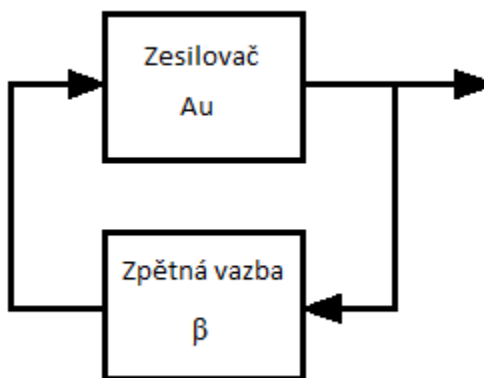
$\varphi = 0^\circ$ Kde φ (fázový posun).

$\varphi = 0 + 2\pi k = 0^\circ, 360^\circ$, $k (0, 1, 2, 3, \dots)$.

- 2) Amplitudová podmínka - celkové zesílení musí být větší než 1:

$$\beta * Au = 1. \quad (3.1)$$

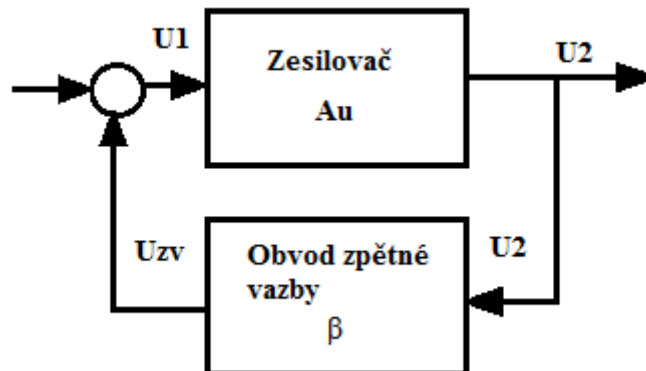
Kde β je činitel zpětné vazby (přenosu) a určuje, jaká část výstupního signálu se vrací zpět na vstup.



Obrázek 3.1: Základní blokové schéma oscilátorů [5]

3.3 Zpětná vazba

Zpětnou vazbou přivádíme část výstupního signálu zpět na vstup. Obvod zpětné vazby tak ovlivňuje všechny vlastnosti daného zapojení.



Obrázek 3.2: Základní blokové schéma zpětné vazby [4]

3.3.1 Odvození Blackova vztahu:

Přenos zesilovače:

$$A_u = \frac{U_2}{U_1}. \quad (3.2)$$

Přenos zpětné vazby:

$$\beta = \frac{U_{zv}}{U_2}. \quad (3.3)$$

Celkové zesílení přenosu:

$$A'_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_2}{U_1 - U_{zv}} = \frac{\frac{U_2}{U_1}}{1 - \frac{U_{zv}}{U_1}} = \frac{A_u}{1 - \frac{U_{zv}}{U_2} \frac{U_2}{U_1}} = \frac{A_u}{1 - \beta A_u}. \quad (3.4)$$

Dělí se na kladnou a zápornou zpětnou vazbu.

Kladná zpětná vazba - při zvýšení signálu z výstupu na vstup způsobí zesílení signálu na výstup:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{A_u}{1 - \beta A_u}. \quad (3.5)$$

Záporná zpětná vazba - při zvýšení signálu z výstupu na vstup, způsobí snížení signálu na výstup:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{A_u}{1 + \beta A_u} \quad [4]. \quad (3.6)$$

4 Realizace fázovacích článků

Přenosová funkce fázovacích článku má tvar:

$$A_{(p)} = \frac{a(-p)}{a(p)}. \quad (4.1)$$

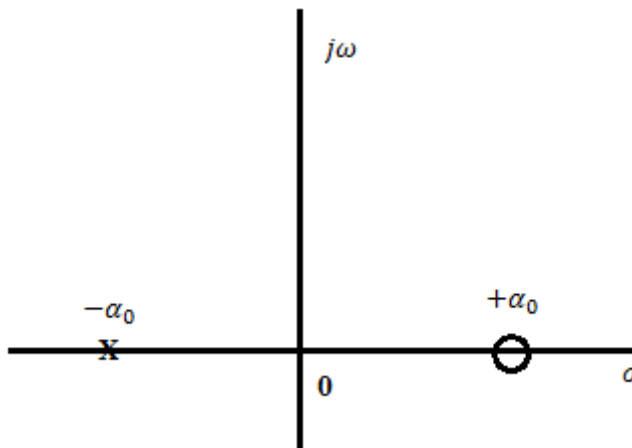
Kde $a(p)$ je Hurwitzův polynom [6].

4.1 Fázovací článek 1. řádu

Přenosová funkce je dána polynomem $a(p)$. Pojmenujeme-li jeho kořen $p_1 = -\alpha_0$ dostaneme:

$$A_{(p)} = \frac{-p + \alpha_0}{p + \alpha_0}. \quad (4.2)$$

Rozložení nulových bodů a pólů v komplexní rovině:



Obrázek 4.1: Rozložení nulových bodů a pólů fázovacích článku 1. řádu

Z přenosu funkce (vzorec. 4.2) pro $p = j\omega$ vyplývá fázová a modulovaná charakteristika:

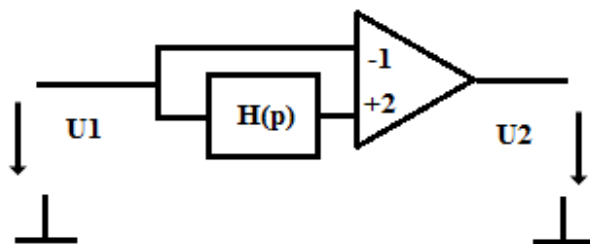
$$\phi(\omega) = -2 \arctan \frac{\omega}{\alpha_0}, \quad (4.3)$$

$$|A(j\omega)| = \frac{|-j\omega + \alpha_0|}{|j\omega + \alpha_0|} = 1. \quad (4.4)$$

Fáze od 0 do $-\pi$, při kmitočtu $\omega = \alpha_0$ je fáze $-\pi/2$ [6].

4.2 Realizace fázovacích článku aktivními RC obvody

Přenosová funkce fázovacího článku lze realizovat pomocí RC obvodu:



Obrázek 4.2: Blokové schéma aktivního fázového článku

$$A(p) = \frac{U_2}{U_1} = 2H(p) - 1 \quad [6]. \quad (4.5)$$

4.3 Aktivní fázovací článek 1. řádu

Pokud $H(p)$ z (obr. 4.2) bude funkce horní propust RC článku:

$$H(p) = \frac{p}{p + \omega_p}, \quad (4.6)$$

kde:

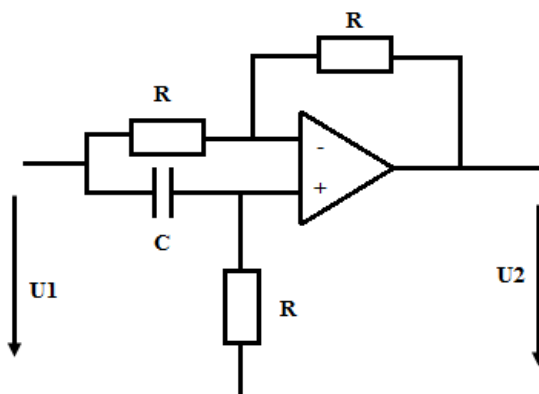
$$\omega_p = \frac{1}{RC}, \quad (4.7)$$

tak bude přenosová funkce:

$$A(p) = \frac{p - \omega_p}{p + \omega_p} = -\frac{p + \omega_p}{p + \omega_p}. \quad (4.8)$$

Vztah se shoduje s přenosovou funkcí fázovacího článku 1. třídy (vzorce. 4.2):

$$\omega_p = \alpha_0 = \frac{1}{RC}. \quad (4.9)$$



Obrázek 4.3: Aktivní realizace fázovacího článku 1. řádu [6]

4.3.1 Výpočet parametru a hodnot součástek

Vypočítáme ω_p pro zadané φ a ω .

Zvolíme se (fí) $\varphi = -60^\circ$, frekvence $f = 100$ Hz, kondenzátor $C = 100$ nF.

Vypočítáme ω :

$$\omega = 2\pi f = 2 * \pi * 100 = 628,32. \quad (4.10)$$

Výpočet fázové charakteristiky:

$$\frac{\varphi}{-2} = \arctan \frac{\omega}{\omega_p} \Rightarrow \tan \frac{\varphi}{-2} = \frac{\omega}{\omega_p} \Rightarrow \omega_p = \frac{\omega}{\tan\left(\frac{\varphi}{-2}\right)}. \quad (4.11)$$

Když,

$$\omega_p = \frac{1}{RC}, \quad (4.12)$$

vypočítáme odpor R ze vzorce (rovnice. 4.9):

$$RC = \frac{\tan \frac{\varphi}{-2}}{\omega} \Rightarrow$$

$$R = \frac{\tan \frac{\varphi}{-2}}{\omega C} = \frac{\tan \frac{-60^\circ}{-2}}{2 * \pi * 100 * 100 * 10^{-9}} = \frac{\tan 30^\circ}{62831} = \frac{0,5773}{62831} = 9188 \Omega \Rightarrow 9,2 k\Omega. \quad (4.13)$$

Výstupní frekvenci vypočteme:

$$f = \left(\frac{1}{2\pi RC} \right) \tan \left(\frac{180 - \varphi}{2} \right). \quad (4.14)$$

Za úhel φ připadající na jednu sekci invertujícího fázovacího článku dosadíme:

$$\varphi = \frac{180}{n}. \quad (4.15)$$

Pro neinvertující zapojení fázovacího článku dosadíme:

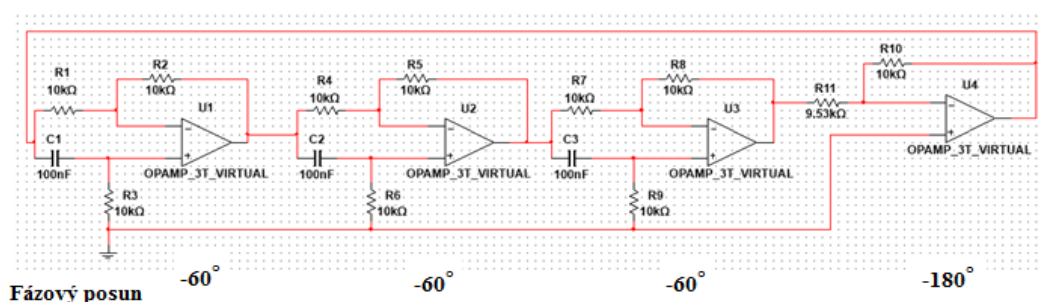
$$\varphi = \frac{360}{n}. \quad (4.16)$$

Kde n je počet fázovacích dvojbranů.

4.4 Fázovací článek ze tří fázovacích jednotek s operačním zesilovačem

Při návrhu generátoru bylo vycházeno ze základního fázovacího článku. Oscilátor musí splňovat fázovací podmínku $\varphi = 0^\circ, 360^\circ$ a pro to každá fázovací jednotka posouvá fázi o -60° . V zapojení jsou tři fázovací jednotky, které dohromady posouvají fázi o -180° a na koni je invertující operační zesilovač nebo neinvertující operační zesilovač který posouvá fázi o -180° . Obvod je napájen zdrojem stejnosměrného napětí 15V. Jako odpor byl zvolen $10\text{k}\Omega$, přestože vypočítaný je $9,2\text{k}\Omega$ (pro lepší dostupnost při praktickém měření) a kondenzátor byl zvolen 100nF . V zapojení je použit invertující operační zesilovač (viz obr. 4.4) a neinvertující operační zesilovač (viz příloha A. 1).

$$3 * (-60^\circ) + 180^\circ = 0^\circ, 360^\circ. \quad (4.17)$$



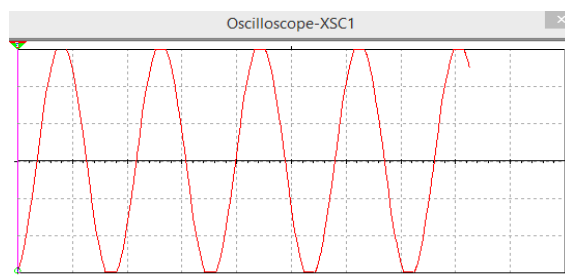
Obrázek 4.4: Fázovací článek tří fázovacích jednotek s invertujícím operačním zesilovačem

Výpočet výstupní frekvence u invertujícího zapojení:

$$f = \left(\frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} \right) \tan \left(\frac{180 - 60}{2} \right) = 159,23 \tan \sqrt{3} = 275\text{Hz}. \quad (4.18)$$

4.4.1 Simulace v programu NI Multisim

Simulace v programu NI Multisim se snažila napodobit, co nejpřesněji, reálné měření v laboratoři. Z toho důvodu byl zvolen obecný operační zesilovač a vstupní stejnosměrné napětí 15V, odpor v invertujícím zapojení je $10\text{k}\Omega$ jen v neinvertující zapojení je odpor R_2 regulovaný a kondenzátor 100nF . Jako výsledek ze simulace je výstupní frekvence, která je u invertujícího zapojení 276Hz (viz obr. 4.5) a u neinvertujícího zapojení $9,70\text{kHz}$.



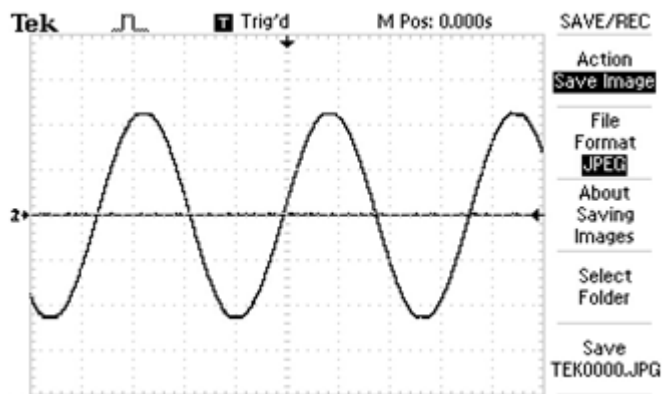
Obrázek 4.5: Ukázka z výstupu ze simulace na osciloskopu invertujícího zapojení

4.4.2 Naměřené výsledky

V laboratoři EB212 bylo měřeno praktické zapojení fázovacích jednotek. Typ operačního zesilovače byl 741 a odpory byly použity podle výpočtu. Z důvodu lepší dostupnosti byl nakonec použit odpor $10\text{k}\Omega$, a kondenzátor 100nF . V neinvertující zapojení a invertující zapojení u operačního zesilovače je odpor R_2 regulovaný. Vše bylo zapojeno podle schématu. Bylo použito napájení zdrojem stejnosměrného napětí 15V (typ 2229) a osciloskop Tektronix TDS 1002B. Naměřené hodnoty jsou znázorněny v následující tabulce.

Tabulka 4.1: *Naměřené výsledky*

	Invertující zapojení			Neinvertující zapojení	
	Vypočítané hodnoty	Naměřené hodnoty	Simulované hodnoty	Naměřené hodnoty	Simulované hodnoty
Kmitočet	275Hz	270Hz	276Hz	10kHz	9,70kHz
Odchylka z vypočítané hodnoty a změřené hodnoty u invertující zapojení 1,8%					
Odchylka z naměřené hodnoty a simulované hodnoty u invertující zapojení 2,17%					

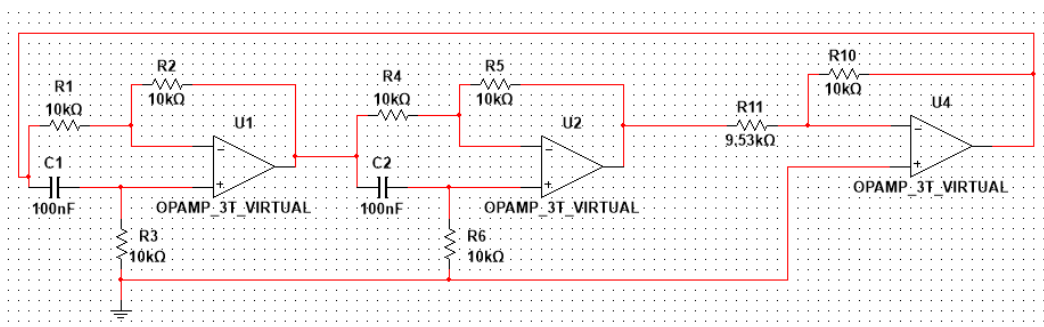


Obrázek 4.6: Ukázka z výstupu z měření u invertující zapojení

4.5 Fázovací článek ze dvou fázovacích jednotek s operačním zesilovačem

Oscilátor musí splňovat fázovací podmínku $\varphi = 0^\circ, 360^\circ$ a pro to každá fázovací jednotka posouvá fázi o -90° . V zapojení jsou dvě fázovací jednotky, které dohromady posouvají fázi o -180° a na koni je invertující operační zesilovač nebo neinvertující operační zesilovač, který posouvá fázi o -180° . Jako v předchozím obvodu byl opět zvolen odpor $10\text{k}\Omega$ a kondenzátor 100nF . V zapojení je použit invertující operační zesilovač (viz obr. 4.7) a neinvertující operační zesilovač (viz příloha A. 2).

$$2 * (-90^\circ) + 180^\circ = 0^\circ. \quad (4.19)$$



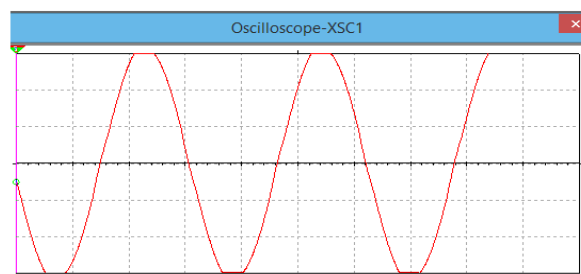
Obrázek 4.7: Fázovací článek dvou fázovacích jednotek s invertujícím operačním zesilovačem

Výpočet výstupní frekvence u invertujícího zapojení:

$$f = \left(\frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} \right) \tan \left(\frac{180 - 90}{2} \right) = 159,23 \tan 45 = 159,23\text{Hz}. \quad (4.20)$$

4.5.1 Simulace v programu NI Multisim

Stejně jako v předchozí simulaci byla i zde snaha o co nejpřesnější napodobení praktického měření. Proto je vstupní napětí 15V . Odpor v invertující zapojení je $10\text{k}\Omega$, jen v neinvertující zapojení je odpor $R2$ regulovaný a kondenzátor 100nF . Jako výsledek ze simulace je výstupní frekvence, která je u invertující zapojení $159,41\text{Hz}$ (viz obr. 4.8) a neinvertující zapojení $44,6\text{kHz}$.



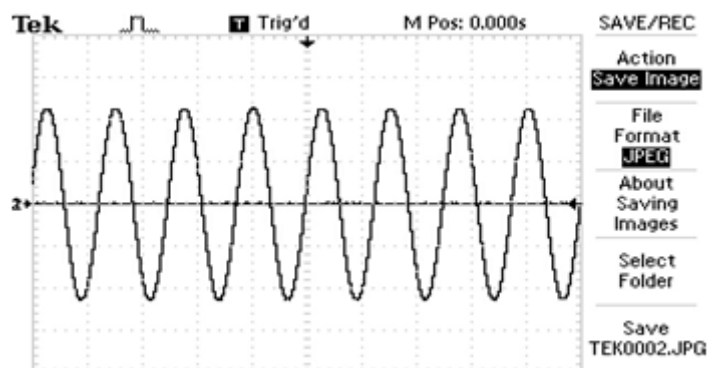
Obrázek 4.8: Ukázka z výstupu ze simulace na osciloskopu invertující zapojení

4.5.2 Naměřené výsledky

Jako u předchozího zapojení bylo v laboratoři EB212 měřeno praktické zapojení fázovacích jednotek. Při vstupním napájení 15V (typ 2229) a osciloskop Tektronix TDS 1002B, odpor $10\text{k}\Omega$, kondenzátor 100nF . V neinvertující zapojení a invertující zapojení u operačního zesilovače je odpor R_2 regulovaný. Opět bylo vše zapojeno podle schématu. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 4.2: *Naměřené výsledky*

	Invertující zapojení			Neinvertující zapojení	
	Vypočítané hodnoty	Naměřené hodnoty	Simulované hodnoty	Naměřené hodnoty	Simulované hodnoty
Kmitočet	159,23Hz	159,40Hz	159Hz	2,4kHz	2,92kHz
Odchylka z vypočítané hodnoty a změřené hodnoty u invertující zapojení 0,1%					
Odchylka z naměřené hodnoty a simulované hodnoty u invertující zapojení 0,25%					

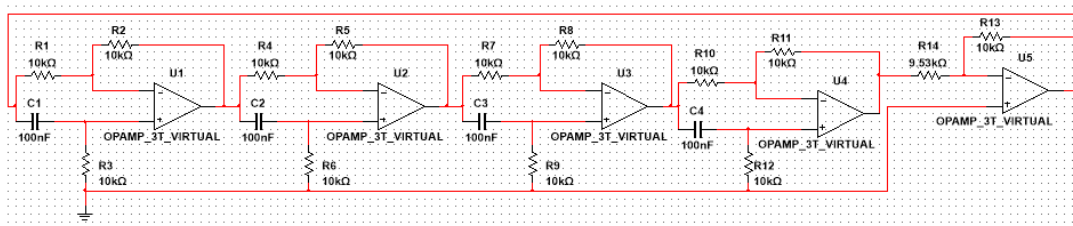


Obrázek 4.9: Ukázka z výstupu z měření u invertující zapojení

4.6 Fázovací článek ze čtyř fázovacích jednotek s operačním zesilovačem

Oscilátor musí splňovat fázovací podmínku $\varphi = 0^\circ, 360^\circ$ a proto každá fázovací jednotka posouvá fázi o -45° . V zapojení jsou čtyři fázovací jednotky, které dohromady posouvají fázi o -180° a na koni je invertující operační zesilovač nebo neinvertující operační zesilovač, který posouvá fázi o -180° . Jako v předchozích obvodech byl opět zvolen odpor $10\text{k}\Omega$ a kondenzátor 100nF . V zapojení je použit invertující operační zesilovač (viz obr. 4.91) a neinvertující operační zesilovač (viz příloha A. 3).

$$4 * (-45^\circ) + 180^\circ = 0^\circ. \quad (4.21)$$



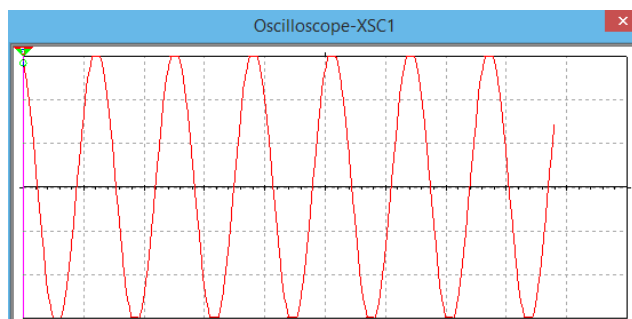
Obrázek 4.91: Fázovací článek čtyř fázovacích jednotek s invertujícím operačním zesilovačem

Výpočet výstupní frekvence u invertujícího zapojení:

$$f = \left(\frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} \right) \tan \left(\frac{180 - 45}{2} \right) = 159,23 \tan 67,5 = 384,4\text{Hz}. \quad (4.22)$$

4.6.1 Simulace v programu NI Multisim

Opět byla v simulaci snaha o co nejpřesnější napodobení praktického měření. Byl zvolen odpor v invertující zapojení $10\text{k}\Omega$, jen v neinvertující zapojení je odpor R_2 regulovaný a kondenzátor 100nF . Při vstupním napětí 15V . Jako výsledek ze simulace je výstupní frekvence, která je u invertující zapojení 380Hz a neinvertující zapojení $3,88\text{kHz}$ (viz obr. 4.92).



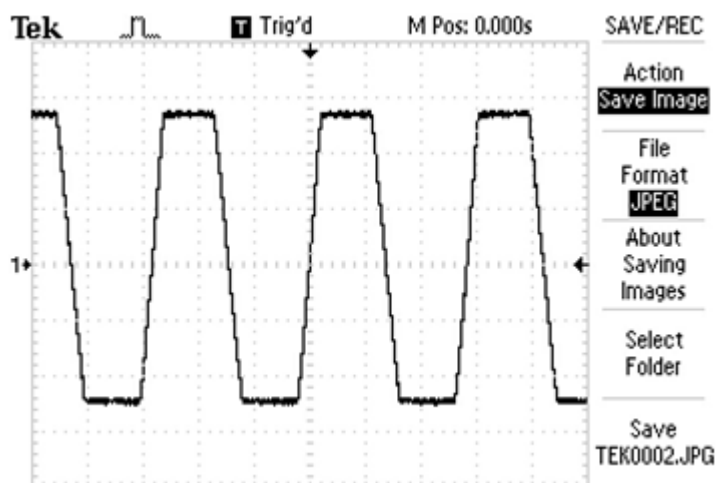
Obrázek 4.92: Ukázka z výstupu ze simulace na osciloskopu neinvertující zapojení

4.6.2 Naměřené výsledky

Jako u předchozího zapojení bylo v laboratoři EB212 měřeno praktické zapojení fázovacích jednotek. Při vstupním napájení 15V, odpor 10k Ω , kondenzátor 100nF. V neinvertující zapojení a invertující zapojení u operačního zesilovače je odpor R_2 regulovaný. Opět bylo vše zapojeno podle schématu. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 4.3: *Naměřené výsledky*

	Invertující zapojení			Neinvertující zapojení	
	Vypočítané hodnoty	Naměřené hodnoty	Simulované hodnoty	Naměřené hodnoty	Simulované hodnoty
Kmitočet	384,4Hz	380Hz	384Hz	1,6kHz	2,1Hz
Odchylka z vypočítané hodnoty a změřené hodnoty u invertující zapojení 1.15%					
Odchylka z naměřené hodnoty a simulované hodnoty u invertující zapojení 1%					



Obrázek 4.93: Ukázka z výstupu z měření u neinvertující zapojení

Závěr

Na závěr bych chtěl zhodnotit výsledky mé bakalářské práce. Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

Teoretická část se zabývala obecným popisem dvojbranů a jejich rozdělením. Část práce byla věnována popisu a rozdělení elektrických filtrů a obecnému popisu oscilátorů a zpětné vazby. Dále se bakalářská práce zabývala fázovacím článkem 1. řádu s aktivními RC obvody. Pro každý typ bylo uvedeno schéma zapojení a popis principu činnosti.

Praktická část bakalářské práce se věnovala návrhu fázovacího článku 1. řádu s aktivním RC obvodem pro invertující a neinvertující zapojení. Praktické měření probíhalo ve školní laboratoři EB212, kde byl použit osciloskop Tektronix TDS 1002B. Oscilátor musí splnit fázovou podmínku $\varphi = 0^\circ, 360^\circ$, a proto každý obvod musel být navržen tak, že posouvá fázi o -180° a na konci každého obvodu je umístěn invertující nebo neinvertující operační zesilovač, který posouvá fázi o -180° , aby splňoval fázovou podmínku. Každý obvod byl napájen zdrojem stejnosměrného napětí 15V.

Z tabulek lze vyčíst, že naměřené a simulované výsledky pro invertující zapojení, odpovídají, až na výjimky, vypočítaným hodnotám a proto splňují podmínky vzniku oscilací. Naproti tomu u neinvertujícího zapojení se rozkmitá frekvence na vyšší kmitočet, který se blíží nulovému fázovému posunu, a z tohoto důvodu jsou také splněny podmínky vzniku oscilací. Z celého měření vyplývá, že je vhodnější použít invertující zapojení.

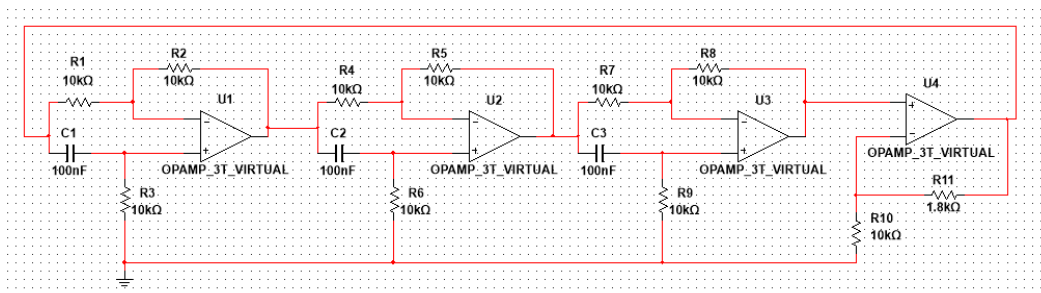
Použitá literatura

- [1] MYSLÍK, Jiří. Elektrické obvody: (příručka pro praxi a učebnice pro střední a vysoké školy). 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1997, 255 s. ISBN 80-86056-19-8
- [2] KVASIL, Josef a Josef ČAJKA. Úvod do syntézy lineárních obvodů. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981, 311 s.
- [3] HAVLÍČEK, Václav a Ivan ZEMÁNEK. Elektrické obvody 2. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008, 368 s. ISBN 978-80-01-03971-7.
- [4] UHLÍŘ, Jan a Zdeněk KŘEČAN. Elektronika pro 2. a 3. ročník SOU: učební text. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985, 295 s.
- [5] MOHYLOVÁ, Jitka a Josef PUNČOCHÁŘ. Elektrické obvody II: základy elektroniky. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-2602-8.
- [6] DAVÍDEK, Vratislav. Analogové a číslicové filtry. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, vii, 345 s. ISBN 80-01-03026-1.

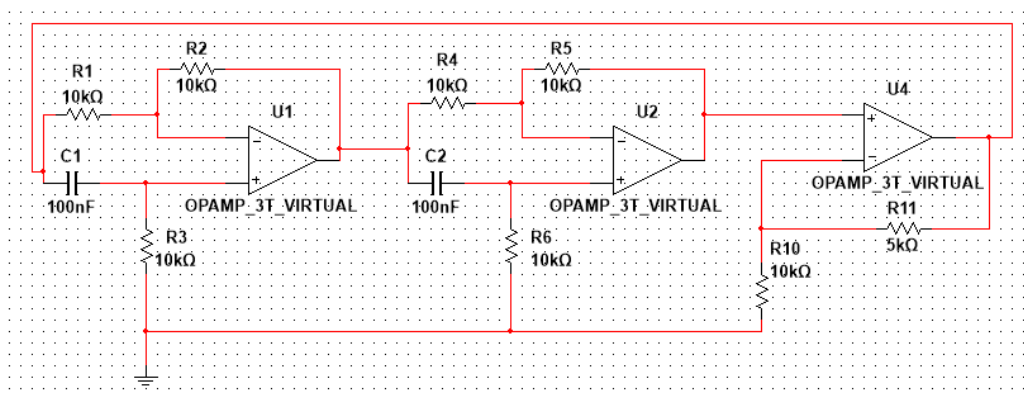
Seznam příloh

Příloha A:	Schémata neinvertujících zapojení.....	I
------------	--	---

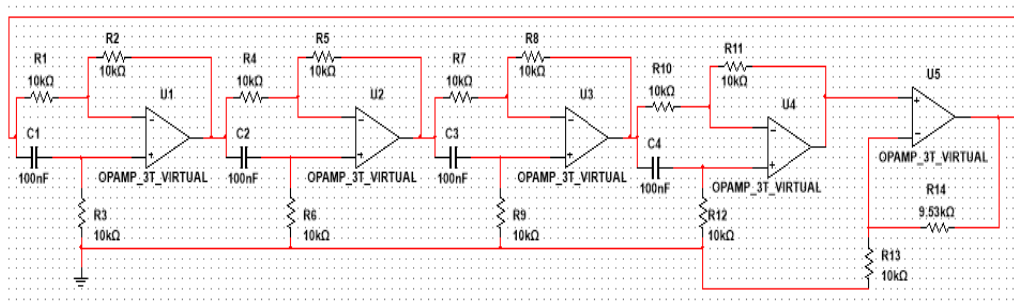
Příloha A: *Schémata neinvertujících zapojení*



Obrázek A. 1: Fázovací článek tří fázovacích jednotek s neinvertujícím operačním zesilovačem



Obrázek A. 2: Fázovací článek dvou fázovacích jednotek s neinvertujícím operačním zesilovačem



Obrázek A. 3: Fázovací článek čtyř fázovacích jednotek s neinvertujícím operačním zesilovačem